微動計 McSEIS-MT NEOの開発と微動探査手法概説

岡谷 智一*・鈴木 晴彦**・中川 博人**

Development of New Instrument (McSEIS-MT NEO) for Microtremor Measurement and Summary of Microtremor Exploration

Tomoichi Okaya*, Haruhiko Suzuki** and Hiroto Nakagawa**

Abstract

It is well known that the evaluation of dynamic characteristics of ground (i.e. site effect) is one of the key components when considering earthquake disaster prevention or mitigation. In order to evaluate the site effect, it is important to obtain the S-wave velocity profile. There are number of methods (e.g., seismic reflection/refraction method) available that are used for this purpose. Among others, microtremor measurement is one of the most popular ways and has been conducted extensively because of its cost effectiveness.

There are several methods to get geophysical information from the microtremor measurement. Major methods are 1) obtaining the phase velocity by array observation of microtremor and 2) obtaining H/V spectrum by using a single three-component sensor. After obtaining the phase velocity or H/V spectrum, we can interpret S-wave velocity profile by applying an inverse analysis.

OYO has developed a new instrument and software called "McSEIS-MT NEO" and "SeisImager/MT NEO" for the purpose of conducting three components of microtremor exploration and interpreting S-wave velocity profile. We think that this newly developed system will become one of the effective equipment for conducting microtremor exploration more easily and accurately.

Keywords: McSEIS-MT NEO, SeisImager/MT NEO, Microtremor, Phase Velocity, H/V Spectrum

(要　旨)

地震時の被害軽減のためには，地盤の振動特性について事前に把握しておくことが不可欠である。地盤の振動特性の把握のためには，特にS波速度構造の推定が重要である。地盤構造推定のために，反射法地震探査や屈折法地震探査など各種の物理探査手法があるが，微動探査は他の探査手法に比べてコスト面において優れており，作業も比較的容易であることから近年盛んに行われている。当社はこれらのニーズに応えるため，新たに3成分観測用の微動計「McSEIS-MT NEO」を開発した。

微動の観測記録から地盤情報を抽出することを目的として，これまでにさまざまな方法が提案されているが，現在では，1）アレイ観測から表面波の位相速度を求める方法，2）単点3成分観測から水平成分と鉛直成分の比（H/Vスペクトル）を求める方法の2通りに大別できる。そして，求められた位相速度やH/Vスペクトルから逆解析でS波の速度構造を求める。

McSEIS-MT NEOには，専用のソフトウェアとして"SeisImager/MT NEO"がオプションとして用意されている。これを用いることで観測波形記録からコヒーレンス，推定位相速度をそれぞれ求めることができ，さらに，逆解析結果（分散曲線およびS波速度構造）を求めるまでの一連の解析ができるようになっている。

今回開発したMcSEIS-MT NEOとSeisImager/MT NEOを用いることで，従来の測定システムに比較して簡便に精度よく地盤のS波速度構造を推定することが可能になった。

キーワード：McSEIS-MT NEO，SeisImager/MT NEO，微動，位相速度，H/Vスペクトル

* 応用地質(株)計測システム事業部　** 応用地質(株)エンジニアリング本部
* OYO Corporation　** OYO Corporation

1.　はじめに

地盤構造を知る物理探査手法として，近年，微動アレイ探査及び常時微動探査が国内外を問わず盛んに行われるようになってきている。これらのニーズに応えるため，微動計 McSEIS-MT NEO を開発した。本報では新たに開発した微動計および専用のソフトウェアを紹介するとともに，微動探査手法について概説する。

2.　微動計McSEIS-MT NEOの紹介

2.1　一体型の装置

写真 -1 に微動計 McSEIS-MT NEO の外観を示す。現場計測時の可搬性，現場設置の容易さ，操作性を考慮し，受振器（センサー），ロガー，バッテリーを一つのシステムケース内に収めた一体型の装置として開発した。一方，外部から速度計受振器を接続するためのコネクター（写真 -2）も有する。特長は次のとおりである。

1）装置は一体型となっているため，ケーブルレスのアレイ配置が可能であり，市街地等での観測も迅速に行える。
2）内蔵の GPS [1] 機能により，各装置間での高精度な時間同期ができる。
3）上部の LCD 表示器により，設置時に波形での動作確認が行えることと，LED ランプを合わせた動作状態表示により，現場での計測開始状態を確実に容易に把握できる。
4）専用解析ソフトウェア SeisImager/MT NEO により，データ収録された SD メモリカードから，データ読み込み，データの確認，H/V スペクトル比の算出および微動アレイ解析（位相速度の推定）を迅速に行うことができる。
5）ダム，橋梁，建築物等を対象とした振動計測におけるセンサー選択の自由度とそれらの接続及び既存の超高性能な長周期速度計の接続を可能とする外部センサー接続用コネクターを標準で有している。また，内蔵バッテリーから外部接続されたセンサーへの電源供給も可能である。
6）オプションの無線 LAN ユニットにより，最大 10 台までの装置の遠隔操作が可能となる。

次に装置のブロックダイヤグラムを図 -1 に示す。また，装置の主な仕様を表 -1 に示す。

写真 -1　微動計 McSEIS-MT NEO の外観
Photo. 1　Appearance of “McSEIS-MT NEO”

写真 -2　速度型受振器外部接続用コネクター
Photo. 2　Connector for an external velocity sensor
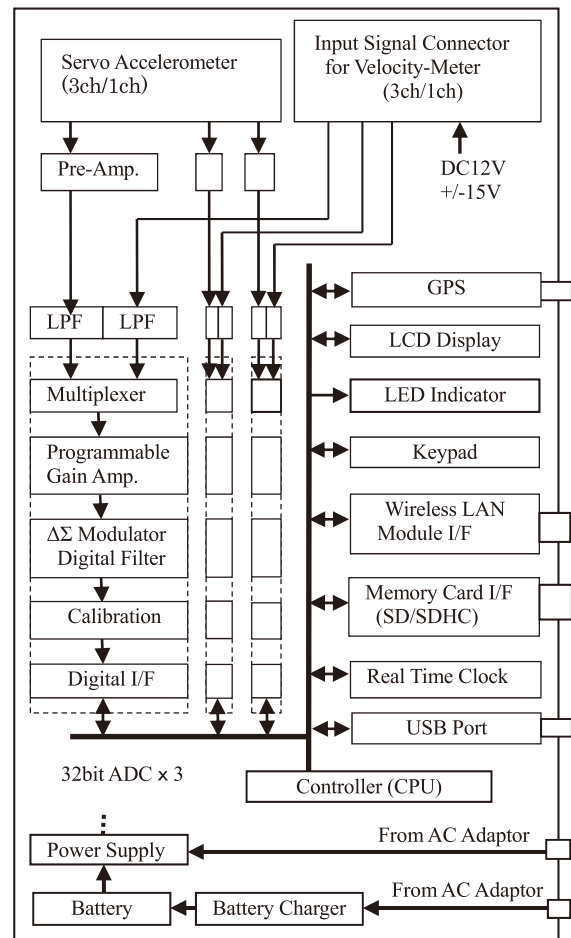
図 -1　McSEIS-MT NEO ブロックダイヤグラム [2～4]
Fig. 1　Block Diagram of McSEIS-MT NEO

表 -1 McSEIS-MT NEO の主な仕様

Table 1 Main Specification of McSEIS-MT NEO

項 目	規格・性能
装置の型	内蔵センサー3 成分型，1 成分型，センサーなし型の 3 種あり
センサー（内蔵）	高性能サーボ加速度計 分解能 1μG，感度 2.0V/G レンジ +/-4G
外部センサー接続	速度型受振器を接続可能（3ch/1ch）
データ収録モード	マニュアル，オート，タイマー
データ記録媒体	SD メモリカード，SDHC メモリカード（2GB, 4GB, 8GB, 16GB）（容量 2GB で，3 成分 15 日間の連続測定可能なメモリ容量）
周波数帯域	0.1Hz～200Hz
サンプリングタイム	2，4，8，10，20，50 msec
A/D コンバーター	地震観測用 32 ビット A/D コンバーター[1] SNR 127dB（10 msec サンプリング）
時間同期と位置情報	GPS による時刻，1PPS 信号による複数装置間の高精度の同期したデータと精度 5m 以内の位置情報を収録可能
電 源	内蔵鉛バッテリー 12VDC，7.2Ah（無線なしの場合，連続 14 時間測定可能） AC アダプターも使用可能
防塵・防滴	IP43 相当
寸 法	220mm（W）×245mm（D）×250mm（H）
重 量	本体 5kg， バッテリー2.5kg
無線ユニット	無線 LAN による最大 10 台までの遠隔操作（最大通信距離約 80m）[5) 6)]

2.2 内蔵受振器選定

装置に内蔵する受振器は，比較的高性能な MEMS 加速度計とサーボ型加速度計をそれぞれ 2 機種使って，動的試験および微動試験を行い選定した[7～12)]。

（1）動的試験

水平方向，垂直方向それぞれ振動台の上に加速度センサーを載せ，測定方向に振動させて実験を行った。図 -2 に水平振動，垂直振動の周波数特性を示す。測定に必要な低周波領域に関しては，MEMS 加速度計がそれぞれ 0.3 Hz，0.4 Hz 付近までの安定度しか有しないのに対して，サーボ型加速度計は 0.1 Hz 付近まで安定している。

（2）微動試験

試験は，3 Hz に卓越した微動信号があることが確認されている箇所で行った。測定は，午前 9 時から開始し，約 11 時間の連続測定を行った。

図 -3 に信号ノイズが最も小さい時間帯（測定開始後 6 時間目の 1 時間）の加速度波形を示す。これより，サーボ型加速度計のノイズレベルが小さく，長時間測定において安定していることがわかる。また，得られた観測波形記録から，それぞれのセンサーのパワースペクトル密度を算出した結果を図 -4 に示す。サーボ型加速度計では既知である 3 Hz 付近で，卓越
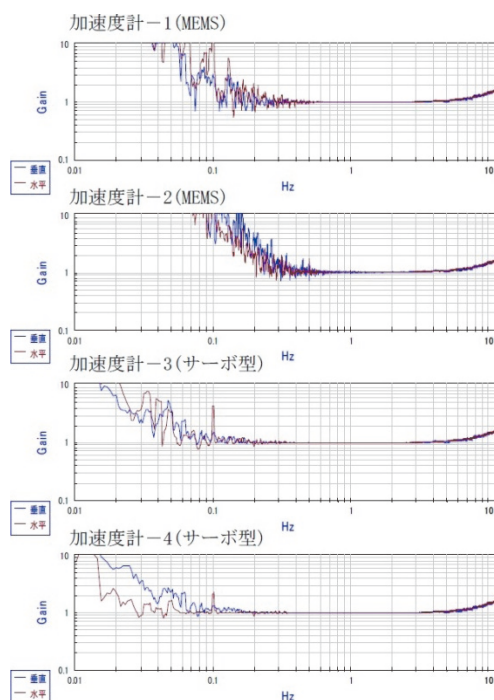
図 -2 各加速度計の周波数特性（振幅）

Fig. 2 Frequency characteristics（Amplitude）of each accelerometer
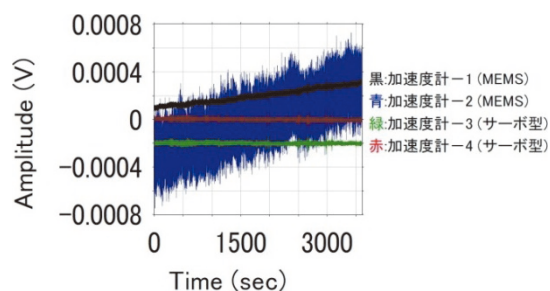
図 -3 最もノイズの小さい微動の 1 時間データ

Fig. 3 Data in one hour at smallest noise level
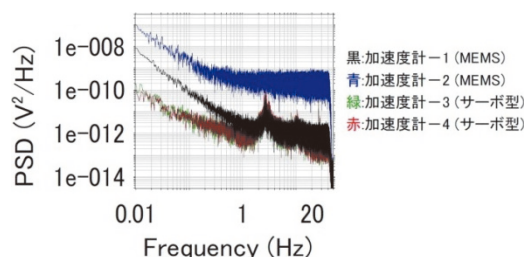
図 -4 パワースペクトル密度

Fig. 4 Power spectrum density

した微動信号が確認されているが，MEMS 型加速度計ではこの微動信号を検出できていないものもあった。

以上の試験結果から本装置に内蔵する受振器は，0.1 Hz 付近までの低周波領域をカバーでき，しかも 3 Hz 付近の微動信号を正しく検出できているサーボ型加速度計を選定することにした。

2.3 専用解析ソフトウェアによる解析例及び計測手法

開発した微動計 McSEIS-MT NEO の専用解析ソフトウェア“SeisImager/MT NEO”は，表面波探査解析ソフトウェア SeisImager-SW をベースに McSEIS-MT NEO に特化したものである。装置の設定ファイル生成と SD メモリカードへの書き込み，SD メモリカードに収録されたデータの読み込み，周波数スペクトル算出，フィルター処理，コヒーレンス値算出，H/V スペクトル算出，微動アレイ探査解析，データのテキスト変換，無線 LAN による McSEIS-MT NEO のコントロール等の機能を有している。

図 -5 に McSEIS-MT NEO による単点 3 成分観測の時刻歴波形および解析ソフト SeisImager/MT NEO による H/V スペクトルの算出結果例を示す。H/V スペクトルを算出するにあたっては，対象とする周波数帯域にもよるが，交通車両等による非定常なノイズを避けるほうが好ましい。SeisImager/MT NEO による解析では大きなノイズを含んだ分割ファイルのデータは，ファイルリストで解析前に削除しておく必要がある。なお，観測時間は周囲の状況や探査目的にもよるが，一般的には 30 分程度の連続測定を行うことが多い。
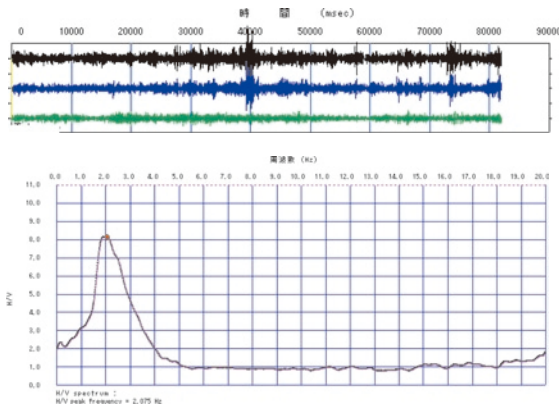
図 -5 観測波形および H/V スペクトル

Fig. 5 Observation data and H/V spectrum

次に，微動アレイ探査の観測の一例を示す。図 -6 に三角形アレイの場合の微動計設置方法を示す。同時に配置する微動計設置数は 4 台，7 台，10 台の場合がある。

測定時間は，対象とする深度（周波数帯域）や交通量等，周囲の状況にもよるが，浅部地盤（短周期側）を対象にする場合には連続 1 時間程度，深部地盤（長周期側）はそれより長い時間測定する。探査深度については，地盤の S 波速度によるが，おおむねアレイサイズの底辺長と同程度となることが多い。
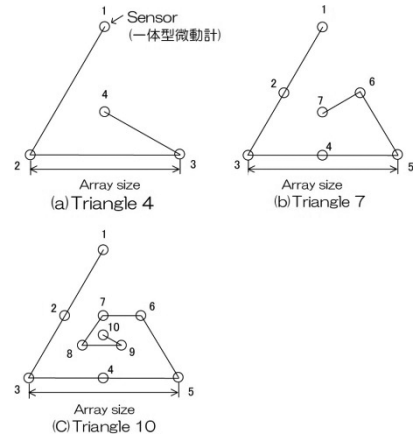
図 -6 三角計アレイでの微動計の配置

Fig. 6 Set up point of the instrument for Triangle Shaped Array

アレイサイズが 50 m，100 m，200 m，350 m，1000 m，4 点三角形アレイの場合における McSEIS-MT NEO で測定したデータを SeisImager/MT NEO によって解析する過程（観測波形記録，コヒーレンス，推定位相速度）と逆解析結果（分散曲線および S 波速度構造）の例を図 -7 a）～ e）に示す。

また，逆解析によって得られた S 波速度構造と PS 検層データとの比較を図 -8 に示す。
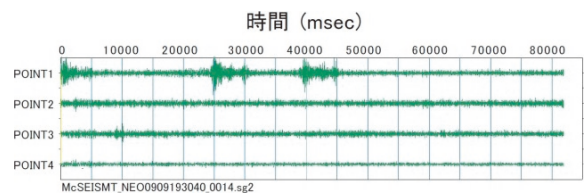
図 -7 a） 200 m 三角形アレイでの観測波形の例

Fig. 7 a） Example of observed data by Triagnle4, Array size is 200 m
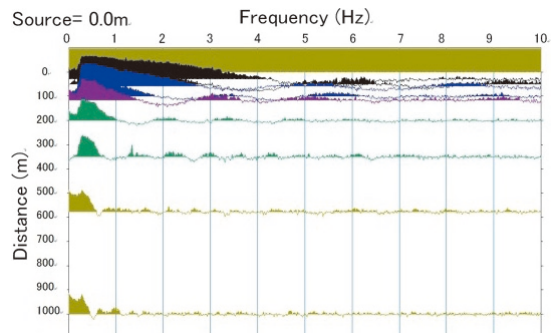
図 -7 b） コヒーレンス

Fig. 7 b） Coherence
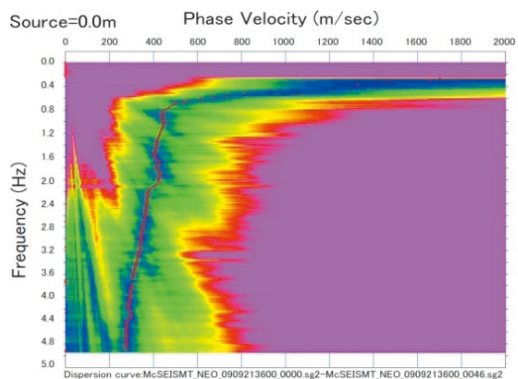
図 -7 c）位相速度イメージ

Fig. 7 c）Image of Phase Velocity
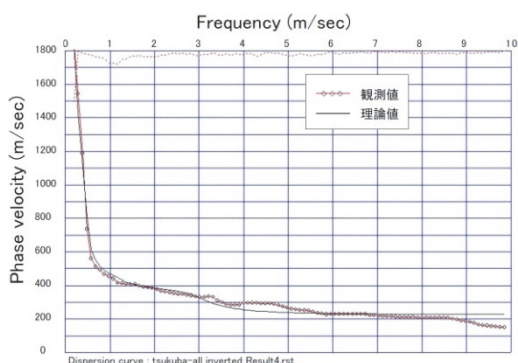
図 -7 d）分散曲線（観測値と理論値の比較）

Fig. 7 d）Dispersion curve（comparison between observed value and theoretical one）
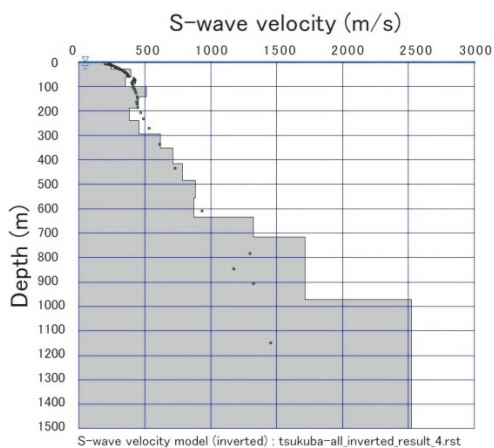
図 -7 e）SeisImager/MT NEO による微動アレイ解析

Fig. 7 e）Analysis of Microtremor Array by SeisImager/MT NEO
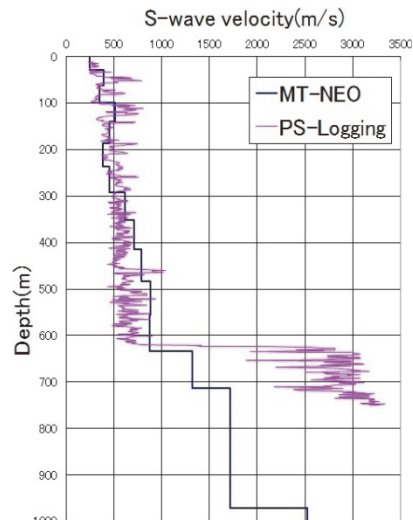
図 -8　PS 検層と McSEIS-MT NEO の比較

Fig. 8　Comparison of S-Wave Velocity Profile between getting from McSEIS-MT NEO and PS-Logging

2. 4　McSEIS-MT NEOの無線LAN機能

図 -9 に McSEIS-MT NEO を 4 台配置した時の無線 LAN 接続のイメージを示す。
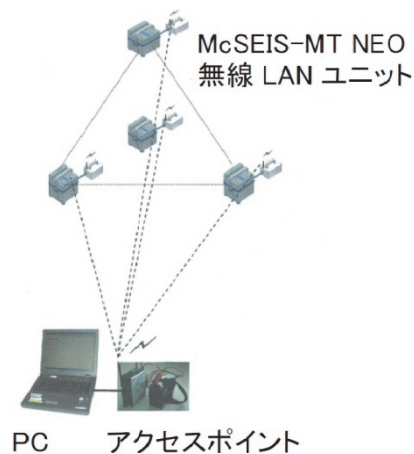
図 -9　無線 LAN 接続

Fig. 9　Connection by Wireless LAN

ソフトウェア SeisImager/MT NEO を用いることにより，無線 LAN 接続した PC と微動アレイ上に配置した各 McSEIS-MT NEO 装置間では，次の機能が可能となる。

1）各装置の測定条件設定状態の読み出しと設定変更

2）PC は，各装置からの波形データをリアルタイム受信と表示（リアルタイムモニター）

3）PC から各装置への測定開始コマンド送付

4）データファイルの読み出し

なお，図 -9 に示す無線 LAN ユニットは，海外仕様のため外付けになっているが，国内用には内蔵することができる。

3.　解析手法概説

微動の研究は古くより行われており，いくつかの詳細なレビューがある[例えば，13～17)]ので，詳しくはそちらを参照されたい。また，微動の適用事例として，地盤を対象としたものだけでなく構造物の振動特性把握のために使用されることもある[18)]が，紙面の都合上，以下では地盤に関する手法のみをとりあげることとする。微動の観測記録から地盤情報を抽出することを目的として，これまでにさまざまな方法が提案されているが，現在では，1）アレイ観測から表面波の位相速度を求める方法，2）単点3成分観測から水平成分と鉛直成分の比（H/V スペクトル）をとる方法の2通りに大別できる。

以下ではこれら2つの方法について概説する。

3.1　アレイ観測から表面波の位相速度を求める方法

微動には実体波と表面波が混在しているが，その発生源の多くは地表面や海底面にあることから，（特に都市部では）表面波のパワーが大きいと考えられており，本節で述べる推定法では，表面波の特性のうちのひとつである分散性（位相速度が振動数によって変化すること）に着目している。なお，表面波にはレイリー波とラブ波があるが，観測の容易さからレイリー波の位相速度を利用することがほとんどである。

以下では，観測記録から位相速度を求める方法として，空間自己相関法（SPAC 法），拡張空間自己相関法（ESPAC 法），周波数－波数スペクトル法（F-k 法）および CCA 法について簡単に処理方法を述べる。これらの手法の詳細は既往の文献[例えば，14），19)]を参考にされたい。

1）空間自己相関法（SPAC 法）[20)]

図 -10 に示すようにアレイの中心点 A と半径 r だけ離れた点 B を考える。ここでは特定の方向から到来する表面波は基本モードのみで構成されると仮定する。観測される微動記録をフーリエ変換したものは次のように表せる。

$$X_A(f)=U_A(f)\exp(-i\phi_A(f)) \qquad (1)$$

$$X_B(f)=U_B(f)\exp(-i\phi_B(f)) \qquad (2)$$

ここに f は振動数，U は振幅，i は虚数，ϕ は位相，下添字は観測点を表す。2点間の複素コヒーレンス $coh(f,r)$ は次式のように書ける。

$$coh(f,r)=\frac{X_A(f)\cdot X_B^*(f)}{U_A(f)\cdot U_B(f)} =\exp\{i(\phi_B-\phi_A)\}=\exp\left\{i\frac{2\pi fr}{c(f,\psi)}\right\} \qquad (3)$$

ここで，* は共役複素数，ψ は到来する平面波と2点間とのなす方位角，c は見かけの位相速度（ψ によって変化する）である。実際の観測では到来方向が不明であるから，到来方向の依存性を解消するために複素コヒーレンスに対し，次式のように方位平均操作をしたものを SPAC 係数と定義する[20)]。

$$\rho(f,r)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\exp\left\{i\frac{2\pi fr}{c(f,\psi)}\right\}d\psi=J_0\left(\frac{2\pi fr}{c(f)}\right) \qquad (4)$$

ここに，$J_0(\cdot)$ は第1種0次のベッセル関数である。したがって，実際の観測では中心点と円周上の観測点のペアからそれぞれ複素コヒーレンスを算出し，平均することにより SPAC 係数を算出し，第1種0次のベッセル関数とフィッティングさせることで，位相速度 $c(f)$ を推定することができる。
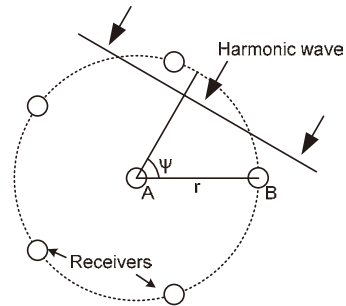
図 -10　アレイに到来する波動

Fig. 10　Configuration of array and plane wave

2）拡張空間自己相関法（拡張 SPAC 法）[21)]

前述の空間自己相関法で得られる（4）式は $r=r_0$，$\alpha=2\pi r$（α は一定値）とおくと，

$$\rho(f)=J_0(\alpha\frac{f}{c(f)}) \qquad (5)$$

と書ける。このとき空間自己相関係数 $\rho(f)$ は周波数 f の関数であり，また位相速度 $c(f)$ も f の関数であることから，周波数 f の線形な変化に対し第1種0次のベッセル関数 $J_0(\cdot)$ の変数は線形に変化しないことが考えられる。つまり，観測から求められる $\rho(f)$ に対応する $J_0(\cdot)$ が必ずしもただ1つとは限らず，ある周波数 f における ρ の値を満足する位相速度 $c(f)$ もただ1つとならないことがある。これに対し，式（4）で，$f=f_0$，$c=c_0$，$\beta=2\pi f_0/c_0$（β は一定値）とおけば

$$\rho(r)=J_0(\beta r) \qquad (6)$$

と表せる。このとき，位相速度 $c(f)$ は一定となるので，半径（観測点間の距離）r の線形な変化は，第1種0

次のベッセル関数 $J_0(\cdot)$ の変数の線形な変化に対応する。つまり，図 -11 に示すように複数の観測点間距離 r について，$\rho(r)$ が求められていれば，最小二乗法的に唯一の $J_0(\cdot)$ を当てはめることが可能となり，ただ 1 つの位相速度が決定されることになる。
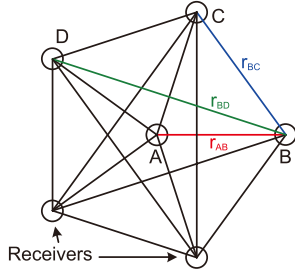
図 -11 拡張空間自己相関法による組み合わせ

Fig. 11 Combinations for calculating SPAC coefficient based on extended SPAC method

3）周波数 - 波数スペクトル法（F-k 法）[22), 23)]

この方法は複数の観測記録から周波数 f ごとに 2 次元波数スペクトルを計算し，ピークとなる波数の位置から位相速度および到来方向を求めるものである。F-k スペクトルについては BFM（Beam Forming Method）[22)] と MLM（Maximum Likelihood Method）[23)] の 2 つが提案されているが，既往の文献 [24)] には MLM による推定の方がより分解能が高いことが示されている。

観測点の数を N とし，l 番目の観測点の位置座標を x_l，そこで観測される記録のフーリエ変換値を $Z_l(f)$ とすれば，MLM による F-k スペクトル $P(f, \mathbf{k})$ は次式で定義される。

$$P(f,\mathbf{k}) = \sum_{l,m=1}^{N} A_l^*(f,\mathbf{k}) A_m(f,\mathbf{k}) G_{lm}(f) \exp\{i\mathbf{k}(\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_m)\} \quad (7)$$

ここに A は重み関数，G は正規化されたクロススペクトルで，それぞれ次式で与えられる。

$$A_l(f,\mathbf{k}) = \frac{\sum_{m=1}^{N} [G_{lm} \exp\{i\mathbf{k}(\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_m)\}]^{-1}}{\sum_{l,m=1}^{N} [G_{lm} \exp\{i\mathbf{k}(\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_m)\}]^{-1}} \quad (8)$$

$$G_{lm}(f) = \frac{Z_l^*(f) Z_m(f)}{|Z_l(f)||Z_m(f)|} \quad (9)$$

ここに * は共役複素数，$\mathbf{k}$ は 2 次元の波数ベクトルである。F-k スペクトルがピークとなる波数ベクトルを $\mathbf{k}_p$ とすれば，次式によって位相速度 c を得る。

$$c = 2\pi f / |\mathbf{k}_p| \quad (10)$$

4）CCA 法 [19), 25), 26)]

この方法は最近提案された新しい手法であり，実施例は他の手法に比べて多くはない。アプローチの骨子は，円形アレイの観測記録から高次のフーリエ係数を抽出することである。図 -12 中段に示すとおり，SPAC 法では第 1 種 0 次のベッセル関数のみを使用するため，低振動数側で SPAC 係数がほぼ 1 になるが，CCA 法では第 1 種 0 次のベッセル関数に加えて，第 1 種 1 次のベッセル関数を使用するため，図 -12 下段に示すように，低振動数側で一定値に漸近することがなく SPAC 法に比べて分解能が高い。したがって，CCA 法では低振動数側における位相速度の決定精度が高く，同じ半径のアレイでも SPAC 法より深い地盤構造の情報を得ることが期待される。

図 -10 に示すように半径 r の円周上に N 個の観測点を設けたとする。j 番目の観測点で時間 t に得られる観測記録を $X_j(t)$ とすれば，円周上の観測点の記録を平均して得られる波形

$$X_0(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} X_j(t) \quad (11)$$

と，$\exp(i\theta_j)$ をかけて方位平均して得られる波形（ただし，i は虚数，θ は観測点の方位角を示す）

$$X_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} X_j(t) \exp(i\theta_j) \quad (12)$$

からそれぞれパワースペクトルを求める。それらの比をとったものを $\rho_{\mathrm{cca}}(f)$ とすれば，レイリー波の位相速度と関連づけられ，単一のモードが卓越すると仮定すれば次式を得る [19), 25)]。

$$\rho_{cca}(f) = \frac{J_0^2(rk(f))}{J_1^2(rk(f))} \quad (13)$$

ここに k は波数，$J_m(\cdot)$ は第 1 種 m 次のベッセル関数である。ここから，対象とする波長がアレイ半径 r より十分長いという前提のもとにベッセル関数を長波長近似すれば，最終的に位相速度 c は次式によって求まる [26)]。

$$c(f) = \pi f r \sqrt{2 + \rho_{cca}(f)} \quad (14)$$

ここでは，円周上で観測された鉛直動からレイリー波の位相速度を求めるという目的のもとで，最低限の定式化だけを示しているが，この他にも高次モードの混入や，中心点を使ったノイズ補正つき CCA 法 [25), 26)]，水平成分の観測からラブ波の位相速度を求める方法 [27)] などもあり，詳細はこれらの文献を参照されたい。
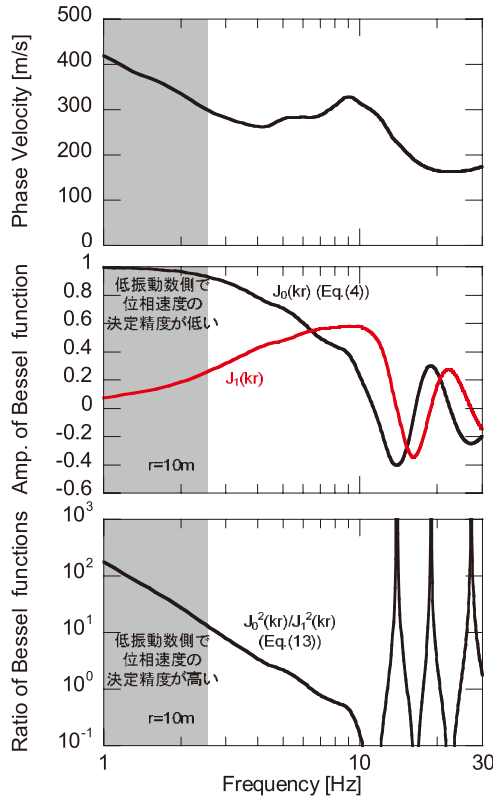
図 -12　位相速度と SPAC 係数および CCA 係数の関係
位相速度の算出にはつくばオフィス敷地内の PS 検層結果を利用した。

Fig. 12　Phase velocity of Rayleigh waves and graphs of functions appearing on the right-hand side of eq. (4) and (13). The phase velocity is calculated using the model at OYO Tsukuba office.

3.2　単点3成分観測からH/Vスペクトルを求める方法

H/V スペクトルとは水平動（Horizontal-component）と鉛直動（Vertical-component）のスペクトル比であり，微動の振動源のスペクトル特性を取り除くために考えられた方法で，観測および記録の処理方法が非常に簡便であることが特徴である。H/V スペクトルは時間によらず広い周期帯域で安定していることが示されており[例えば28]，観測点直下およびその周辺の地盤構造と深い関係を持っていることは疑いないが，両者の因果関係についての明確な理論はなく，理論的解釈については今なお議論が続けられている。

H/V スペクトルは当初，中村ら[28]によって地盤の増幅特性（S 波の鉛直下方入射による伝達関数）とおおむね対応することが示された。また，H/V スペクトルのピーク周期が S 波の伝達関数の卓越周期（地盤の固有周期）と一致することは，多くの実例[例えば29]があり，実際の業務では H/V スペクトルから地盤種別を判定することもある。この方法の妥当性を数値シミュレーションによって検討し，地盤の速度コントラストが大きければ H/V スペクトルは S 波の伝達関数に対応するという報告もある[30]が，物理的根拠が必ずしも明確にはなっていない。

微動の主成分を表面波とすれば，H/V スペクトルはレイリー波およびラブ波の水平動成分の和とレイリー波の鉛直動成分の比と考える方が妥当である。微動を表面波の重ね合わせであるとして，近年，基本モードだけでなく，表面波の高次モードを考慮した理論 H/V スペクトルが時松ら[31]によって示され，逆解析による S 波速度構造の推定が行われている[32]。

さらに最近では，表面波および実体波を考慮した理論 H/V スペクトルも提案されており[33]，動向を注視する必要があると考えている。

3.3　逆解析によるS波速度構造の推定

観測記録から得られる位相速度や H/V スペクトルから P 波や S 波の速度構造を求めるにあたっては逆解析を行う必要がある。図 -13 に逆解析の概念図[34]を示す。前述の方法により，微動観測から得られた位相速度および H/V スペクトルが計算結果と合うように平行成層でモデル化した地盤のパラメータを変化させ，計算値と観測値の誤差が小さくなるようにするものである。位相速度や H/V スペクトルは計算の際に必要となる地盤構造のパラメータ（例えば，S 波速度や層厚）に対して，非線形となることから逆解析の手法は非線形最小二乗法[35]が用いられることが多かったが，勾配法に代表されるこの手法は初期モデルに依存するため解の安定性が悪い場合がある。このため，よりロバスト性の高い遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた逆解析も提案されている[36]。

この手法は大局的探索に有効であり，実用的にも優れているが，最小二乗法に比べて収束能力が低いことや計算時間がかかるなどの短所もある。最近ではこれらの短所を克服するために GA と焼きなまし法をハイブリッドした方法も提案されている[37]。
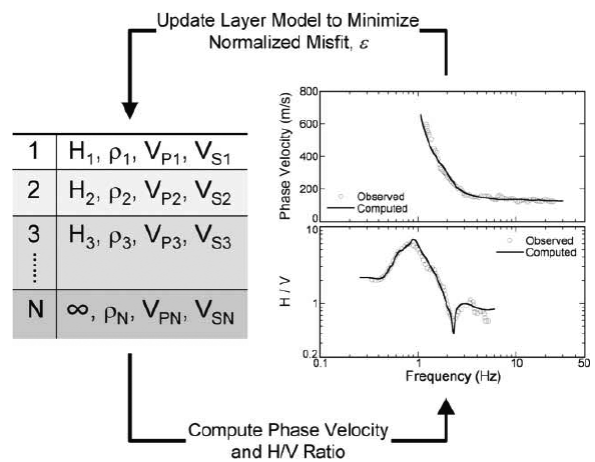
図 -13　位相速度と H/V スペクトルによる逆解析の概要図[34]

Fig. 13　Schematic diagram showing joint inversion by the use of both phase velocity and H/V spectrum[34]

4. まとめ

本報では微動アレイ探査および常時微動測定用データロガーとして開発した McSEIS-MT NEO の紹介とその専用解析ソフトウェア SeisImager/MT NEO による具体的な解析例を紹介した。

また，微動探査の解析手法について概説したが，SeisImager/MT NEO では，SPAC 法および拡張 SPAC 法による解析が可能であり，今回開発した McSEIS-MT NEO を用いることで 3 成分観測が手軽に行える。したがって，従来の微動探査手法に加えて，水平成分を利用する方法（たとえば，レイリー波だけでなくラブ波を対象とする方法）への適用も考えられ，従来のものに比べて，より精度よく地盤の S 波速度構造が推定できる可能性がある。また，地盤の S 波速度構造推定のみならず，建物などの構造物を対象とした振動特性推定にも利用することも考えられ，McSEIS-MT NEO は有用な測定ツールとして，広範な分野に適用できるものと考える。

参 考 文 献

1） Ublox(2010) : Data Sheet “LEA-5 u-blox 5 GPS Modules”.
2） Texas Instruments(2009) : High-Resolution Analog-to-Digital Converter ADS1282.
3） ルネサステクノロジ（2009）:Data Sheet “R32C/111 グループ ルネサスマイクロコンピュータ”.
4） 遠藤俊昭（2009）:計測のためのアナログ回路設計, CQ 出版社 .
5） Moxa(2011) : “AirWorks AWK-3121 User's Manual”.
6） Moxa(2007) : “NPort W2150/2250 Plus Series User's Manual”.
7） 応用地質（株），応用地震計測（株）（2009）:実験レポート“振動センサ評価実験”.
8） COLIBRYS(2009) : DataSheet “SF1500SA/SF1500NA”.
9） SILICON DESIGNS, INC : Data Sheet “Model 1221”.
10） 東京計器（2008）:取扱説明書 ” サーボ加速度計 TA-25E-05-10.
11） 日本航空電子工業（株）（2005）:取扱説明書 “サーボ加速度計 JA-40GA04”.
12） 日本航空電子工業（株）（2006）:航空電子技報 No.29 技術紹介“14 低ノイズ加速度計の開発（JA-40GA）”.
13） 堀家正則（1993）:微動の研究について，地震，第 2 輯 , **46**, 343-350.
14） 物理探査学会（1998）:物理探査ハンドブック手法編第 4 章 微動・振動 , 193-225.
15） Bard, P.-Y.(1999) : Microtremor Measurements : A Tool for Site Effect Estimation?, Proc. the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds), 1251-1279.
16） Asten, M. W.(2006) : On Bias and Noise in Passive Seismic Data from Finite Circular Array Data Processed Using SPAC Methods, Geophysics, **71**, V153-V162.
17） 岡田広（2008）:微動探査の現状と課題，物理探査 , **61**, 445-456.
18） 日本建築学会（2000）:建築物の減衰
19） Cho, I., T. Tada and Y. Shinozaki(2004) : A New Method to Determine Phase Velocities of Rayleigh Waves from Microseisms, Geophysics, **69**, 1535-1551.
20） Aki, K.(1957) : Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Micro-tremors, Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 415-457.
21） 凌甦群，岡田広（1993）:微動探査法における空間自己相関法の拡張，物理探査学会第 89 回学術講演会論文集 , 44-48.
22） Lacoss, R.T., E.J. Kelly, and M. N. Toksöz (1969) : Estimation of Seismic Noise Structure Using Array, Geophysics, **29**, 21-38.
23） Capon, J.(1969) : High-Resolution Frequency-Wave-number Spectrum Analysis, Proc. IEEE, **57**, 1408-1418.
24） Horike, M.(1985) : Inversion of Phase Velocity of Long-Period Microtremors to the S-Wave-Velocity Structure down to the Basement in Urbanized Areas, J. Phys. Earth, **33**, 59-96.
25） Cho, I., T. Tada and Y. Shinozaki(2006) : Centerless Circular Array Method: Inferring Phase Velocities of Rayleigh Waves in Broad Wavelength Ranges Using Microtremor Records, J. Geophys. Res., **111**, B09315.
26） Tada, T., I. Cho and Y. Shinozaki(2007) : Beyond the SPAC Metohd: Exploiting the Wealth of Circular-Array Methods for Microtremor Exploration, Bull. Seism. Soc. Am., **97**, 2080-2095.
27） Tada, T., I. Cho and Y. Shinozaki(2009) : New Circular-Array Microtremor Techniques to Infer Love-Wave Phase Velocities, Bull. Seism. Soc. Am., **99**, 2912-2926.
28） 中村豊，上野真（1986）:地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤推定の試み，第 7 回日本地震工学シンポジウム講演集 , 265-270.
29） 先名重樹，翠川三郎，若松加寿江（2008）:常時微動の H/V スペクトル比と地形・地盤分類を用いた増幅率の推定，日本地震工学会論文集 , **8**,

1-15.

30) 若松邦夫，安井譲（1995）：短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，**471**, 61-70.

31) 時松孝次，新井洋（1998）：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響，日本建築学会構造系論文集，**511**, 69-76.

32) Arai, H. and K. Tokimatsu（2004）: S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, Bull. Seism. Soc. Am., **94**, 53-63.

33) Sánchez-Sesma, F. J. *et al.*（2010）: Site Effects Assessment Using Seismic Noize, 9th Int'l Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction, Mexico, 10pages.

34) Arai, H. and K. Tokimatsu（2005）: S-wave Velocity Profiling by Joint Inversion of Microtremor Dispersion Curve and Horizontal-to-Vertical（H/V）Spectrum, Bull. Seism. Soc. Am., **95**, 1766-1778.

35) 中川徹，小柳義夫（1982）：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会.

36) 山中浩明，石田寛（1995）：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，**468**, 9-17.

37) 山中浩明（2007）：ハイブリッドヒューリスティック探索による位相速度の逆解析，物理探査，**60**, 265-275.